

加齢による水晶体の黄色化が薄明視レベルの視作業性に及ぼす影響

専門会員 明石行生 (福井大学), 非会員 中川慶子 (福井大学)

The Effect of Yellowing Human Crystalline Lens on Mesopic Visual Performance

Fellow member Yukio Akashi (University of Fukui), Non member Keiko Nakagawa (University of Fukui)

KEYWORDS : Mesopic vision, target detection, reaction time, lens yellowing, aging

1. はじめに

夜間道路において自動車を運転している時などに体験する薄明視の明るさレベル (以降, 薄明視レベルと呼ぶ) において, ヒトの目は, 明所視レベルより短波長放射に対する感度が高くなる。これは, 古くからプルキンエ効果として知られている^{1)~10)}。プルキンエ効果は, 薄明視レベルでは錐体に加えて, 錐体より感度のピークが短波長側にある桿体が同時に働くことが原因である。

現在の測光システムは, 明所視レベルの錐体の働きだけを考慮し, 上述のような薄明視レベルの桿体の働きを考慮していない。そのため, 薄明視レベルにおいて, 短波長放射が多いランプが明るさ知覚に及ぼす効果を過小評価してしまう。例えば, 夜間道路において, 短波長放射が多いメタルハライドランプで照明した空間と長波長放射が多い高圧ナトリウムランプで照明した空間とを比較する場合, 空間内の道路面および障害物などの視票の表面の照度 (輝度) が同一であっても, メタルハライドランプで照明した空間の方が明るく見える。また, 高圧ナトリウムランプで照明した視票よりメタルハライドランプで照明した視票の方が検出しやすい。

国際照明委員会 (CIE) は, 2002 年, 視票検出などの視作業性に基いて, 錐体の感度に桿体の感度を加えた薄明視の測光システムを構築することを目的として, 技術委員会 TC1-58 を設立した。TC1-58 には, Unified System of Photometry (USP)⁹⁾ と Mesopic Optimization of Visual Efficiency System (MOVE)¹⁰⁾ の二つのモデルが提案された。TC1-58 は, 建設的な討議の末, 2010 年, USP と MOVE の両者を折衷したモデルである MES2 を標準化することに決定した¹¹⁾。

しかし, 上述した3種類の薄明視の測光システム (以降, 薄明視測光システムとよぶ) には, 共通したいくつかの課題がある。この薄明視測光システムを実際の道路照明施設に広く適用する前に, それらの課題を解決しておく必要がある。あるいは, これらの薄明視測光システムを実環境に適用する際には, 少なくとも測光システムの課題を把握しておく必要がある。

今回, 筆者らは, これらの課題のうち, 薄明視測光システムは, 年齢によるヒトの視覚特性の差異を考慮していないことに注目した。ヒトの目の水晶体は, 加齢とともに黄色化する。それに伴い, 短波長光の吸収が増加する。そのため, 高齢者は若年齢者に比べ, 光源からの光が角膜に入射してから網膜に到達するまでに, より

多くの短波長放射を失うことになる。このような加齢による視覚特性の変化は, 上述した薄明視測光システムにどの程度の影響を与えるのであろうか。さらに, 高齢者に対しても, 短波長放射の多い分光分布の光源による照明下において周辺視の視作業性が高まるという既往の実験結果^{9)~16)}を適用することができるのであろうか。具体的には, 薄明視レベルの照明施設において, 高圧ナトリウムランプより短波長放射を多く含むメタルハライドランプの方が万人に適していると言えるのだろうか。

今回, 上述した疑問に答えるために, 薄明視レベルにおいて視票照度 (輝度) が一定の場合, 短波長の放射量が異なる光源間における高齢者の周辺視野の視作業性の差異は, 若年齢者のそれに比べて小さいのか, また, そうであれば, 加齢とともにどの程度小さくなるのかを調べることを目的として実験を行った。

2. 実験

2.1 実験装置

実験は, 窓を遮光カーテン (サンゲツ CK8371) で覆った, 幅 5 m, 奥行 4 m, 高さ 2.7 m の実験室で行った。この実験室の天井と壁は無彩色に塗装され, それぞれの反射率は, 86% と 65% であった。天井と壁の分光反射率を測定した結果, それぞれの分光反射率は可視光の波長域で均一であるため, 反射光の分光特性に影響しないことを確認した。また, 室内に置かれた机と本棚を暗幕で覆った。

この実験室に, 視票提示装置, スイッチ, コンピュータ, 照明装置から構成される実験装置を設置した。図 1 に実験装置の概略図を示す。視票提示装置は, 6 個の視票を埋め込んだ 900 mm×1200 mm の黒色スチレンボード (反射率 5%) であった。この視票提示装置を高さ 0.7 m の机の上に設置した。6 つの視票は, ボードの中心から左右に 5 度, 10 度, 20 度の偏み角の位置に埋め込んだ。各視票は, 表と裏をそれぞれ黒 (同 4%) と白 (同 80%) で塗装した, 直径 13 mm, 厚さ 0.4 mm の円盤であった。この円盤は, 磁気を帯び, 2 つの電磁石を利用した磁気表示器に組み込まれている。一つ目の電磁石の端子間に電圧をかけることにより, 円盤を瞬時に黒から白に裏返し, 二つ目の電磁石の端子間に電圧をかけることにより, 白から黒に戻した。

この磁気表示器をデジタル信号出力インターフェース（ナショナルインストルメンツ社製 NI-9421）を介してコンピュータに接続した。ボード中心の被験者の固視点を示すため、中心から上下に 3cm 離れた位置にそれぞれ直径 5 mm の白色の円を記した。

スイッチは、被験者が視票を検出した時に信号を送るための押しボタン式のスイッチである。このスイッチを、デジタル信号入力インターフェース（同 NI-9472）を介してコンピュータに接続した。コンピュータには計測制御ソフトウェア LabVIEW8.6（ナショナルインストルメンツ社）をインストールした。このソフトウェアを用いて、プログラムを作成し、視票の提示とスイッチからの受信ができるようにした。このプログラムにより、視票が提示されてから被験者がスイッチを押すまでの時間を反応時間として計測・記録した。この反応時間を視作業性の指標（従属変数）として用いた。なお、実験中、被験者の目がボードから 1m 距離をおいたところに位置するように、顎台で顔の位置を固定した。

照明装置は、被験者の頭上に、6つの視票が全て均一な照度で照明されるように取り付けられた。次節にこの照明器具の詳細を述べる。

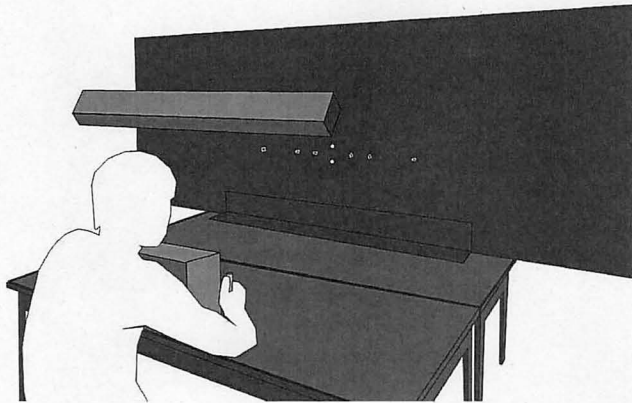


図1 実験装置の概略図（被験者の頭上に有るのが照明器具）

Fig. 1 View of experimental setup.

2.2 照明器具と光源

実験では、視票と背景を照明する光源として、青緑色 LED（ピーク波長 505 nm）と黄色 LED（同 590 nm）を用いた。20 個の青緑色 LED を基板に装着し、長さ 1000 mm、幅 100 mm、奥行 50 mm のアルミ箱の中に取り付けた。このアルミ箱の一面（長さ 1000 mm × 幅 100 mm の面）には乳白板をはめ込んだ。アクリル箱の内装を艶消し白色ペイントで塗装した。30 個の黄色 LED を別の同形のアルミ箱に取り付けた。実験では、これらの 2 つのアルミ箱を照明器具として用いた。照明条件を変えるときには、照明器具ごと取り換えた。

図2に、上述の2種類のLEDから乳白板を通して照射された光の分光分布を示す。この測定には、分光照度計（大塚電子株式会社製 MCPD-770）を用いた。青緑色LEDと黄色LEDの分光分布から明所視輝度（照度）に対する暗所視輝度（照度）の比（以降、S/P比とよぶ）を計算したところ、それぞれ、3.31と0.23であった。これらのLEDを実験用光源として用いた理由は、青緑色LEDは、分光分布のピークが桿体の分光感度のピークに近いために、桿体を効果的に刺激すると考えたためであり、また、黄色LEDは、分光分布のピークが錐体の分光感度のピークに近いために、錐体を効果的に刺激すると考えたためである。両LEDは、直流電源を用いて調光した。

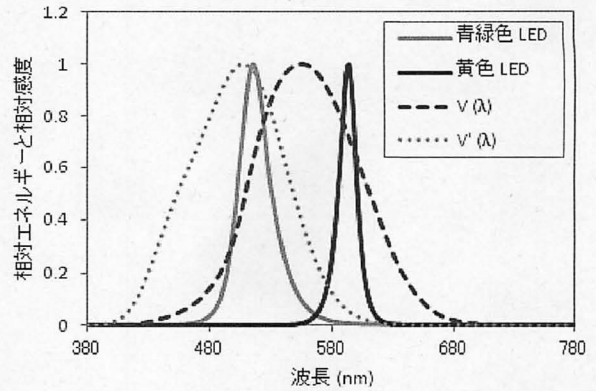


図2 実験に用いた光源（青緑色 LED、黄色 LED）の分光分布と錐体および桿体の分光感度（それぞれ、 $V(\lambda)$ と $V'(\lambda)$ ）

Fig. 2 Spectral power distributions of cyan LED and yellow LED employed in the experiment, comparing with spectral sensitivity functions of retinal cones $V(\lambda)$ and rods $V'(\lambda)$.

2.3 実験条件と被験者

独立変数として、光源の分光分布、視票の輝度、視票の位置を変化させた。表1に実験条件を示す。なお、実験中は、視票面の鉛直面照度を指標として測定することにより実験条件を設定した。表1に示す視票輝度は、視票照度から算出した反射率 80% の視票の白色面の輝度である。視票提示の繰り返し回数は、各条件下で8回とした。

加齢により黄色化した水晶体の分光透過率をシミュレートするために、Two-factor lens-density model¹⁷⁾に基づいて岡嶋らによって開発された高齢者眼模擬メガネ¹⁸⁾（以降、模擬メガネと呼ぶ）を用いた。

本実験には、12名の若年者（平均年齢22歳）と19名の高年齢者（平均年齢68歳）が被験者として参加した。22歳の若年者がこの模擬メガネをかけると、本人の水晶体と模擬メガネを合わせた分光透過率が72歳の平均的な高年齢者のそれと同等になる。若年齢の被験者は、前述の6つの実験条件下でこのメガネをかけない場合とかけた場合の2回、視作業を繰り返した。一方、高年齢の被験者は、模擬メガネをかけずに1度だけ実験に参加した。

表1 実験条件

Table 1 Experimental conditions.

独立変数	水準
光源	青緑色 LED, 黄色 LED
視票照度 [lx] (視票輝度 [cd/m ²])	0.14, 1.4, 14 (0.04, 0.4, 4)
視票提示位置 [度]	-20, -10, -5, 5, 10, 20

2.4 実験手順

実験には、若年齢の被験者から参加し、次に高年齢の被験者が参加した。実験条件の提示順序の偏りを極力なくするために、6つの実験条件は、各被験者に対して乱数表に基づいてランダムな順序で提示した。

若年齢の被験者については、その半数は模擬メガネをかけた条件から始め、残りの半数は模擬メガネをかけない条件から始めた。つぎに実験手順を示す。

- ① 実験に先立ち、実験者は、実験室に視票照度 1.4 lx（視票輝度 0.4 cd/m²）の実験条件を練習用に設定した。実験者は、被験者を実験室に案内し、視票提示装置の前の椅子に座らせた。被験者に実験手順を説明し、特に、実験中は常に視野中央を固視すること、中心以外の視票は、中心視で見るとは異なる周辺視で検出することを強調した。
- ② 順応終了後、実験者は被験者に 30 回視票を提示し、練習をさせた。被験者は、実験室に入室してから練習終了までの約 10 分間、実験室の明るさに順応したことになる。被験者の練習が終了した後、実験者は、実験用の照明条件を設定した。その間、被験者は、実験室の中で待機した。実験条件設定後、被験者は、実験条件の明るさに 5 分間順応した。
- ③ 実験者は、コンピュータのプログラムを開始することにより実験を始めた。コンピュータは、6 つの視票をそれぞれ 10 回ずつ（計 60 回）ランダムな順序で提示した。被験者は、視票の 1 つが白く変わったことを検出するや否や手元のスイッチを押した。被験者がスイッチを押すと視票は白から黒に戻った。コンピュータは、視票を提示してから被験者がスイッチを押すまでの時間を被験者の反応時間として記録した。数秒間のインターバルの後、コンピュータは、次の視票を提示した。コンピュータは、視票提示のインターバルを 2~8 秒の間で乱数を用いて決めた。コンピュータは、視票を 48 回提示した後、被験者の反応時間を記録してプログラムを終了した。
- ④ 全ての被験者に対して、③を残りの 5 つの実験条件に対して繰り返した。①から④まで約 1 時間を要した。
- ⑤ 若年齢の被験者に対しては、①~④を、高齢者眼模擬メガネをかけた条件とかけていない条件について繰り返した。

2.5 実験結果

得られた全ての反応時間を用いて、被験者、光源、視票照度ごとに反応時間の平均値を求めた。図 3a, 3b, 3c に、模擬メガネをかけていない若年齢の被験者、模擬メガネをかけた若年齢の被験者、高齢者の被験者の順に視票輝度に対する反応時間の平均値および標準偏差を示す。図 3 の 3 つのグラフと t 検定の結果から、視票照度が増加するにつれて反応時間は減少するという共通した傾向を見出した ($p < 0.01$)。

図 3a（模擬メガネのかけない若年齢の被験者）は、視票照度が 0.14 lx ($p < 0.01$) と 1.4 lx ($p < 0.05$) の条件下において、青緑色 LED の照明下における被験者の反応時間は、黄色 LED のそれよりも短いことを示す。しかし、視票照度が 14 lx の時には、両光源の照明条件下において反応時間に有意差はなかった。このことにより、薄明視に関する既往研究と薄明視測光システムの結果¹¹⁻¹⁶を確認した。

図 3b（模擬メガネをかけた若年齢の被験者）は、視票照度が 0.14 lx の条件下では、青緑色 LED の照明下における被験者の反応時間は、黄色 LED のそれよりも短いことを示す ($p < 0.01$)。しかし、視票照度が 1.4 lx のときには有意差は小さくなり、視票照度が 14 lx のときには有意差がなくなった。さらに、視票照度が 14 lx になると、黄色 LED の照明条件下の方が青緑色 LED のそれより反応時間が短くなった（有意差はない）。

このことは、黄色 LED が発する光は、もともと短波長域の放射を含まないために、短波長光をカットする模擬メガネにより吸収されないのに対して、青緑色 LED からの光に含まれる短波長放射の多くはメガネにより吸収されたからであると考えられる。

図 3c（高齢者の被験者）は、視票照度が 0.14 lx の時には、青緑色 LED の照明下で被験者の反応時間は、黄色 LED のそれより短いことを示す ($p < 0.05$)。しかし、視票照度が高くなると、LED 間の反応時間の差異が小さくなり、有意差が無くなる。高齢者の場合、若年齢者の場合より、LED 間の反応時間の差異は小さい。例えば、視票照度が 1.4 lx の時には、若年齢者の反応時間は LED 間で有意差があるが、高齢者の反応時間は LED 間で有意差がない。このことは、高齢者の目には、若年齢者が模擬メガネをかけたような加齢変化が生じていることを示している。しかし、高齢者の場合、視票照度が 14 lx の時に、黄色 LED 照明下での反応時間が青緑色 LED 照明下での反応時間よりわずかに長いことから、水晶体による短波長放射の吸収だけが増加したのではなく、長波長放射の吸収も増加したことが推察できる。また、高齢者の反応時間は、若年齢者のそれよりも長くなった。このことは、加齢による水晶体の黄色化以外の視覚の変化、運動能力の低下、注意の集中能力の低下などが影響したと考えられる。

3. まとめ

今回、薄明視レベルにおいて、短波長放射量が異なる光源間における高齢者の視作業性の差異は、若年齢者のそれに比べて小さくなるかどうかを調べるために、青緑色 LED と黄色 LED を用いて実験を行った。

実験の結果、高齢者の視覚に関しても薄明視レベルでのブルキンエ効果を確認した。しかし、高齢者の水晶体が黄色化することにより、高齢者の網膜に到達する光のうち特に短波長光が減少するために、ブルキンエ効果の程度が若年齢者のそれより小さくなることを明らかにした。

実用的には、薄明視レベルの照明施設において、例えば、高圧ナトリウムランプよりも短波長放射が多いメタルハライドランプを用いることにより、高齢者の運転者および歩行者の周辺視での視作業性は向上するが、その向上の程度は、若年齢者よりも小さいと言える。

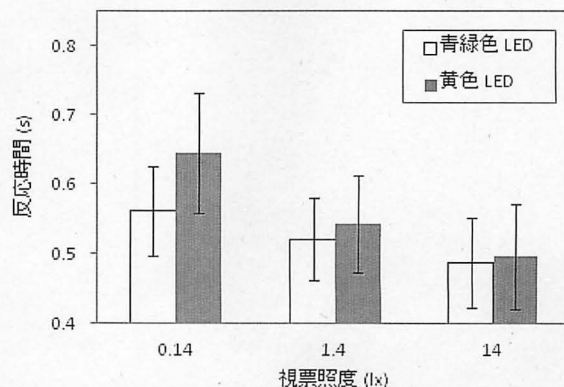


図 3a 若年齢者（模擬メガネなし）の反応時間

Fig. 3a Reaction times for young subjects.

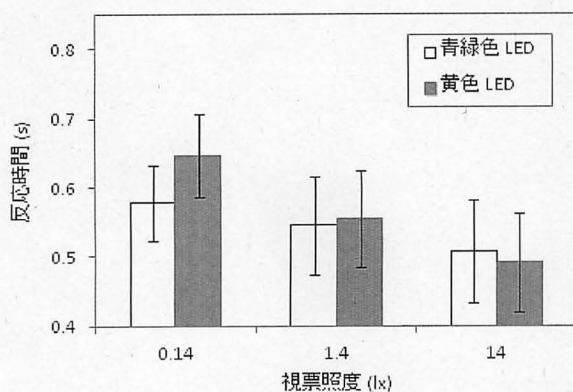


図 3b 若年齢者（模擬メガネあり）の反応時間

Fig. 3b Reaction times for young subjects with yellow glasses.

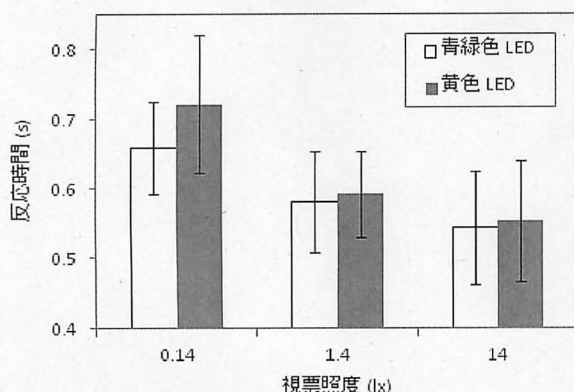


図 3c 高齢者の反応時間

Fig. 3c Reaction times for older subjects.

本研究は、照明学会研究・教育助成金（第 17BF001 号）を受けて行いました。実験に参加いただいた被験者の方々に感謝します。

参考文献

- (1) Palmer, DA.: A system of mesopic photometry. *Nature*, 209, pp.276-281 (1966).
- (2) Kokoschka, S.: Untersuchungen zur mesopischen Strahlungsbewertung. *Die Farbe*, 21, pp.39-112 (1972).
- (3) Ikeda, M. and Shimozono, H.: Mesopic luminous efficiency functions. *Journal of the Optical Society of America*, 71, pp.280-284 (1981).
- (4) Sagawa, K. and Takeichi, K.: Spectral luminous efficiency functions in the mesopic range. *Journal of the Optical Society of America A*, 3, pp.71-75 (1986).
- (5) Trezona, PW.: A system of mesopic photometry. *Color Research and Application*, 16, pp.202-216 (1991).

- (6) Sagawa, K. and Takeichi, K.: System of mesopic photometry for evaluating lights in terms of comparative brightness relationships. *Journal of the Optical Society of America A*, 9, pp.1240-1246 (1992).
- (7) Sagawa, K.: Toward a CIE supplementary system of photometry: brightness at any levels including mesopic vision. *Optical Physiol. Opt.*, 26, pp.240-245 (2006).
- (8) Sagawa, K. and Takeichi, K.: System of mesopic photometry for evaluating lights in terms of comparative brightness relationships. *Journal of the Optical Society of America A*, 9, pp.1240-1246 (1992).
- (9) Rea, MS., Bullough, JD., Freyssinier-Nova JP., and Bierman A.: A proposed unified system of photometry. *Lighting Research & Technology*, 36, 2, pp.85-111 (2004).
- (10) Elotholma, M. and Halonen, L.: New model for mesopic photometry and its application to road lighting. *LEUKOS*, 2, 4, pp.263-293 (2006).
- (11) Commission Internationale de l'Eclairage. CIE 191: *Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance*. Vienna: CIE (2010).
- (12) Bullough, JD. and Rea, MS.: Simulated driving performance and peripheral detection at mesopic and low photopic light levels. *Lighting Research & Technology*, 32, pp.194-198 (2000).
- (13) Bullough, JD. and Rea, MS.: Driving in snow: effect of headlamp color at mesopic and photopic light levels. *SAE Technical Paper Series No. 2001-01-0320*. Society of Automotive Engineers (2001).
- (14) Akashi, Y., Rea, MS., and Bullough, JD.: Driver decision making in response of peripheral moving targets under mesopic light levels. *Lighting Research & Technology*, 39, 1, pp.53-67 (2007).
- (15) He, Y., Bierman, A., and Rea, MS.: Evaluating light source efficacy under mesopic conditions using reaction times. *Journal of Illuminating Engineering Society*, 26, pp.125-138 (1997).
- (16) He, Y., Bierman, A. and Rea, MS.: A system of mesopic photometry. *Lighting Research & Technology*, 30, pp.175-181 (1998).
- (17) Xu, J., Pokorny, J., and Smith, VC.: Optical density of the human lens. *Journal of the Optical Society of America A*, 14, pp.953-960 (1997).
- (18) 岡嶋克典, 岩田三千子: 水晶体加齢モデルによる高齢者の照明シミュレーションと最適照度の検討. *照明学会誌*, 82, 8A, pp.564-572 (1998).

(受付日 2011 年 11 月 30 日/採録日 2012 年 2 月 2 日)



明石行生（専門会員）

福井大学大学院工学研究科建築建設工学専攻
〒910-8507 福井市文京 3-9-1

博士（工学），1985 年 東京工業大学総合理工学
研究科博士前期課程修了，同年 松下電器産業株式
会社照明研究所，1999 年 Lighting Research
Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 2007
年より現所属。



中川慶子（非会員）

2009 年福井大学工学部建築建設工学科卒業。
2011 年福井大学大学院工学研究科建築建設工学
専攻博士前期課程修了。現在，小松ウオール工
業株式会社勤務。